ZESZYT 7—9. 1909. ROCZNIK XXXIV.

KOSMOS



WE LWOWIE.

NAKŁADEM POLSKIEGO TOWARZYSTWA PRZYRODNIKÓW IM. KOPERNIKA.

I. ZWIĄZKOWA DRUKARNIA WE LWOWIE UL. LINDEGO L. 4.

1909.

Kilka uwag o fizycznych podstawach teoryi górotwórczych

(Einige Bemerkungen über die physikalischen Grundlagen der Theorien der Gebirgsbildung),

podał

Dr. M. SMOLUCHOWSKI.

W artykule niniejszym chciałbym, zachęcony przez kolegę prof. Zubera, podać krytyczną analizę kilku nowszych prac z zakresu tektoniki, wyróżniających się od zwykłych prac geologicznych użyciem metody spekulatywnego, dedukcyjnego rozumowania, które nas uprawnia do zaliczenia ich raczej w zakres geofizyki; a przy tej sposobności chciałbym też zwrócić uwagę na niektóre nowsze badania fizyczne, wiążące się ściśle z podstawowymi problematami tam poruszonymi.

Punkt wyjścia stanowi rozprawa Dr. O. Ampferera „Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen“ [Jahrbuch d. Geol. Reichsanstalt, Wien (1906) **56**, 539—622], w której autor ten zapomocą dedukcyi teoretyczno-fizycznej wyprowadza daleko idące wnioski co do mechanizmu zjawisk górotwórczych, dające się streścić w zbiciu kontrakcyjnej teoryi tworzenia się gór, oraz postawieniu własnej teoryi górotwórczej. Z pracą tą ogłoszoną w tak poważnej publikacyi, należy się zaznajomić, choć z góry zaznaczam, że wyniki jej uważam za zupełnie błędne, gdyż rozumowania autora nie tylko grzeszą zupełnym brakiem ścisłości matematycznej, niezbędnej w tego rodzaju spekulacyach (w całej pracy, na 82 stronach, nie ma ani jednego wzoru matematycznego), ale w znacznej części stoją

w sprzeczności z elementarnemi zasadami fizyki, a w szczególności teoryi wytrzymałości. Przejdźmy do jej zanalizowania.

Autor wychodzi z rozważania nad wytrzymałością skał i tu robi pewne uwagi, zawierające słuszną myśl, choć w niezupełnie poprawnej formie wyrażoną. Chodzi o zasadę, znaną we fizyce pod nazwą podobieństwa dynamicznego a mającą w tym wypadku pewne znaczenie dla zrozumienia profilów geologicznych. Procesy górotwórcze zależą od stosunku siły ciężkości i wewnętrznych naprężeń w skorupie ziemskiej, z jakich bądź przyczyn pochodzących, do sprężystości i wytrzymałości skał. Zważmy, że przy zmniejszeniu proporcyonalnem wszystkich rozmiarów jakiegoś ciała zmniejszamy ciężar przypadający na każdy centymetr kwadratowy w stosunku rozmiarów liniowych. Jeżeli zatem profil lub model wykreślony w stosunku 1 : 10 000 ma przedstawić należycie rolę ciężkości w stosunku do wytrzymałości skał, to musimy sobie (przy niezmienionej gęstości materyału i niezmienionem natężeniu ciężkości) wyobrazić w owym profilu wszystkie spółczynniki sprężystości i wytrzymałości zmniejszone w stosunku 1 : 10 000. Np. granit, posiadający wytrzymałość taką, że słup o maksymalnej wysokości 3570 *m* właśnie jeszcze by istnieć potrafił bez skruszenia swej własnej podstawy, musiałby być oddany w owym modelu przez substancyę nie zdolną do tworzenia słupów wyższych ponad 35·7 *cm*. Niestety nie znamy takiej substancyi całkiem odpowiedniej; musiałaby ona być miększa, czyli raczej mniej wytrzymała od masła przy temperaturze pokojowej. Porównanie takie byłoby jednak o tyle niestosowne, że wzbudzałoby błędne mniemanie, jakoby także plastyczność owych skał granitowych była ilustrowana przez plastyczność masła. Przeciwnie, model powinień zachować zupełną kruchość (ściśle mówiąc długość czasu relaksacyi, o czem później) odpowiadającą granitowi.

Powróćmy do dalszej argumentacyi autora. Otóż wyobraża sobie obręcz wyciętą z zewnętrznej skorupy ziemi wzdłuż największego koła i zastanawia się nad wytrzymałością takiego sklepienia względem siły ciężkości, a później analogiczne rozważania stosuje do sklepienia kulistego. Powołując się pod tym względem na obliczenie niejakiego Wepfera wnioskuje, że naprężenie powstające w owej obręczy wskutek ciążenia

ku środkowi przewyższałoby 1720 razy wytrzymałość granitu przeciwko zgnieceniu, a zatem że taka obręcz zostałaby natychmiastowo skruszona wskutek własnego ciężaru. Istotnie, elementarnym sposobem dowieść można, że naprzężenie w takiej obręczy równałoby się ciśnieniu słupa o wysokości równej promieniu ziemi, a odpowiednie naprężenie w sklepieniu kulistem wynosiłoby połowę owej wartości, co zawsze jeszcze jest blizko tysiąc razy więcej niż owa wysokość zgodna z wytrzymałością granitu.

Nic w tym rezultacie nie ma dziwnego, każdy technik wie jednak, że n. p. w moście zupełnie inne napięcią panują, jeżeli jest podtrzymany przez filary, a inne jeżeli te filary zostaną usunięte. W rzeczywistości właśnie skorupa ziemska nie tworzy sklepienia nad pustym jądrem, lecz spoczywa na masywnej podstawie, która unosi cały jej ciężar, czyli jak autor sam na jednem miejscu powiada: „Das ganze Gewölbe schwimmt auf der Unterlage“. Wynika więc tylko, że o tem jak skorupa ziemska w istocie się zachowuje, nie można żadnym sposobem wnioskować na podstawie sposobu jak ona by się zachowywała, gdyby tworzyła puste sklepienie.

Autor jednak wciąż i w dalszym ciągu się zastanawia nad zjawiskami w takich sklepieniach występującymi, bez względu na podkład, na którym spoczywają, i różne wnioski stąd, bądź świadomie, bądź nieświadomie, przenosi na przypadek rzeczywistości. Stąd zatem pochodzi jego twierdzenie o nadzwyczajnej słabości owej skorupy ziemskiej „w stosunku do wielkości ziemi“, i wprowadzenie słowa „Erdhaut“ dla uwydatnienia tej słabości. Nicby przeciwko temu mieć nie można, gdyby słowo to nie nasuwało mimowoli wyobrażenia jakoby „skóra ziemska“ miększa była od wewnętrznego ciała i szkieletu, podczas gdy prawdopodobnie jest właśnie przeciwnie. Występuje to dobitnie w porównaniu, którem autor ilustruje teoryę kontrakcyjną: globusem o promieniu 6 *m*, zdolnym do kurczenia się, na którym warstwa pokostu, gruba na 1 *cm*, reprezentuje ową „skórę ziemską“. Gdy taki globus nieco się skurczy, okaże się skutek tylko w jednostajnem zgrubieniu i pomarszczeniu warstwy pokostu. Podobnie, według autora, przy jednostajnej kontrakcyi ziemi musiałoby na-

stąpić tylko jednostajne zmiażdżenie owego sklepienia, a w dalszym ciągu zgrubienie i jednostajne pomarszczenie — w zupełnej sprzeczności z tem co w rzeczywistości widzimy na ziemi. Autor stanowczo powstaje przeciwko przyjęciu, żeby te przesunięcia się mogły zesumować i wytworzyć na jednem miejscu potężne sfałdowanie, pozostawiając resztę powierzchni niezmarszczoną — jak to Heim przyjmował dla Alp — i wielokrotnie powtarza twierdzenie o potworności („Ungeheuerlichkeit“) tego przyjęcia.

Pokazuje się tu jasno kruchość metody argumentacyi autora. A kładę nacisk na ten szczegół, gdyż także inni badacze w tem upatrywali zarzut przeciwko teoryi kontrakcyjnej, że wielkie obszary ziemi nie są wcale pofałdowane, więc brak w nich owego ogólnego pomarszczenia. Gdyby, tak jak w owym przykładzie z globusem, zewnętrzne warstwy ziemi były bardzo miękkie w porównaniu z jądrem i gdyby do tego podkładu były przylepione dzięki stosunkowo znacznej adhezyi, w takim razie powinnoby istotnie powstać ogólne pomarszczenie, i owo porównanie byłoby słuszne. Jeżeli jednak, co w dalszym ciągu uznamy za bardzo prawdopodobne, wnętrze ziemi jest do pewnego stopnia plastyczne lub płynne[1]), albo wogóle mniej wytrzymałe od zewnętrznych warstw, to całe porównanie upada. Wtedy należałoby raczej ziemię porównać z jajem, albo z masą wody, pokrytą cienką skorupą lodu; skurczenie się wewnętrznej cieczy nie spowodowałoby tutaj jednostajnego zgrubienia ani zmiażdżenia tylko załamanie się wzdłuż pewnych pęknięć, a ewentualnie przy spełnieniu pewnych warunków mechanicznych, sfałdowanie się w pewnych miejscach. Coś analogicznego obserwujemy przy rozciąganiu prętu szklannego Przy użyciu dostatecznej siły przerwie się w j e d n e m miejscu, chociażby pozornie nawet grubość prętu w wszystkich częściach była jednakowa; wyciągając zaś ten sam pręt ogrzany do żółtego żaru, otrzymamy w przybliżeniu jednakowe zwężenie przekroju w całej długości. Tak samo i w przypadku skorupy ziemskiej zależy wszystko od stopnia wytrzymałości i plastyczności wewnętrznych a zewnętrznych warstw, i apodyktyczne potępienie

[1]) Wszak sam autor w dalszym ciągu, zapewne pod wpływem teoryi O. Fishera nawet przypuszcza możliwość prądów w wewnętrznej magmie.

na tej podstawie kontrakcyjnej teoryi wytworzenia się jednego potężnego pasma górskiego jest zupełnie nieuzasadnione.

Jeszcze jaskrawiej występują skutki mylnej metody rozumowania autora — mylnej, bo opartej na rozważaniu fikcyjnego sklepienia pustego, w następnych rozdziałach, gdzie autor roztrząsa jeszcze możliwość nierównomierności w materyałach skorupy, lub nierównoczesności zjawiska kontrakcyi. Widać z nich, że autor pomieszał dwa całkiem różne przypadki wytrzymałości, z których w dodatku żaden nie stosuje się do skorupy ziemskiej: sklepienia poprzednio omawianego, podlegającego napięciom stycznym, i sklepionych łuków, opartych o stałe punkty wsparcia i dźwigających obciążenie pionowe. Chyba tak można sobie wytłómaczyć jego mniemanie, że wytrzymałość każdej części owego sklepienia będzie zależna od jego wielkości, i że dostatecznie małe „Teilgewölbe“ potrafią się oprzeć sile kontrakcyjnej bez zgniecenia, podczas gdy większe muszą się złamać. Na prawdę zaś sklepienie ziemskie albo jest puste, wtedy nie ma żadnego „Teilgewölbe“, mogącego się samodzielnie utrzymać, i wszystko zostanie zmiażdżone, albo — jak w rzeczywistości — sklepienie spoczywa całą swą podstawą na wewnętrznych warstwach ziemi, a wtedy również pojęcie „Teilgewölbe“ nie ma sensu i w ogóle nic dalej wnioskować nie można bez wyraźnego założenia co do sposobu, jak sklepienie złączone jest z podstawą.

W obec tak zasadniczych błędów mało interesu przedstawia szczegółowe rozważanie dalszych z nich wypływających konsekwencyi. Wspomnę tylko, że autor zupełnie błędnie wystawia sobie mechaniczny wpływ słabszego miejsca lub, w krańcowym przypadku, otworu w skorupie ziemskiej, a w dalszym ciągu bez dostatecznego uzasadnienia jako normalny typ nierównomierności w skorupie ziemskiej przyjmuje skład tejże z płyt stosunkowo sztywnych („Schollen“), oddzielonych od siebie miękkiemi masami, jakby kanałami. Oczywiście przy takiem założeniu powstałyby fałdy tylko między owemi płytami, tworząc koło każdej z nich zamknięty wał górski, o stosunkowo małych rozmiarach wskutek małości owych „Teilgewölbe“. Powstałaby zatem niejako sieć pasm górskich. Tego na ziemi nie widzimy i również pewne inne kryterya, które autor na tejże podstawie wyprowadza, nie są sprawdzone w rzeczywis-

tości, a z tego autor wyciąga konkluzyę — potępienie teoryi kontrakcyjnej. W rzeczywistości możnaby na podstawie hipotezy kontrakcyjnej równie dobrze wytłomaczyć jakibądź kształt pasm górskich, choćby przyjmując, że tam właśnie były miejsca o mniejszej wytrzymałości skorupy, gdyż jak wspominaliśmy ograniczanie rozmiarów płyt do owych fantazyjnych „Teilgewölbe" nie ma najmniejszego mechanicznego uzasadnienia.

Nie będę wchodził w szczegółową analizę następnego rozdziału, zawierającego krytykę, przeważnie zupełnie słuszną, innych teoryi górotwórczych, a z następującej części, poświęconej szczegółowej „anatomii" fałd, wybiorę tylko jeden, co prawda ważny szczegół, jako przykład metody autora: apodyktycznego wypowiadania daleko sięgających twierdzeń bez ścisłego matematyczno-fizycznego uzasadnienia. Chodzi o to, czy zgniecenie stosunkowo szerokiej strefy miększych warstw przez dwie twardsze płyty, w kierunku stycznym ku sobie się zbliżające, spowoduje fałdowanie — 1) tylko u brzegów miękkiej strefy, czy 2) po całym jej obszarze, czy też 3) tylko w jej środkowej części. Autor rozstrzyga bez wahania na korzyść hipotezy (1), a porzuca (3) jako hipotezę która „nimmt keine Rücksicht auf die Grenzen der beiden Medien und ist daher höchst unwahrscheinlich", i również porzuca (2), głównie dlatego że ta hipoteza jest sprzeczna z bezwładnością mas zgniatanych! „Die Aufstauung der Falten an der Stirn der schiebenden Scholle ist der klare Ausdruck des großen Trägheitswiderstandes der ruhenden Massen gegen eine erzwungene Ortsveränderung." Gdzież można mówić o wpływie bezwładności wobec ogromnej powolności ruchów górotwórczych! Wszak wogóle o rozstrzygnięciu całej kwestyi mowy być nie może bez bliższego określenia, w jaki sposób owe warstwy złączone są z podkładem i jakie są mechaniczne własności owego podkładu, a o tem autor ani słowem nie wspomina, jak gdyby to wciąż chodziło o sklepienie puste. Z łatwością podać można takie przykłady, w których wypiętrzenie musiałoby wystąpić właśnie w środku, zgodnie z hipotezą (3); wszak to jest np. normalny sposób bocznego wygięcia i złamania się („Knicken") długich słupów lub płyt, zgniatanych przez siły cisnące wzdłuż osi (resp. płaszczyzny). Wszak krzywa, przedstawiająca formy osi takiego prętu sprężystego, tzw. »*elastica*« studyowana przez

Eulera, przeszło wiek temu, właśnie taki posiada kształt falisty jaki autor narysował jako ilustracyę potępionej hipotezy (2).

Następujący rozdział jest poświęcony krytyce teoryi Schardt-Lugeona, przedmiot, do którego później jeszcze powrócimy, a końcowy rozdział — własnej teoryi autora, którą tenże przeciwstawia teoryi kontrakcyjnej i innym teoryom górotwórczym. Te rozważania autora są bardzo ogólnikowe. Dowiódłszy według swego mniemania, że góry fałdowe nie mogły powstać wskutek wzajemnych ciśnień, wywieranych na siebie przez twardsze płyty o większych rozmiarach, wnioskuje że są one „Streifen eigener Entstehungskraft“, albo jak na innem miejscu powiada: „Kraftlinien im Antlitz der Erde“. Przez linie siły rozumiemy we fizyce coś całkiem odmiennego, ale mniejsza o słowo. Chce autor powiedzieć, że siły, które wytworzyły dane pasmo górskie, musiały być zlokalizowane ściśle w obrębie owego pasma w głębiach ziemi. Jakie to są siły, autor nie powiada, tylko ogólnikowo zaznacza, że pochodzą ze zmian objętościowych, z powodów fizycznych lub chemicznych, że te zmiany powodują prądy w wewnętrznych plastycznych masach „Unterströmungserscheinungen“, że wskutek tego na powierzchni występują zapadliny, wzniesienia lub przesunięcia styczne oraz fałdowania, i że tym sposobem powierzchnia ziemi tworzy obraz, „Abbildung“, wewnętrznego podłoża.

Trudno coś powiedzieć o tak mało sprecyzowanej teoryi. O ile ma charakter negatywny, t. j. zaprzeczający możliwości przenoszenia naprężeń górotwórczych na większą odległość w skutek słabości skorupy ziemskiej, jest ona zupełnie błędna, jak to poprzednio widzieliśmy. Dla tego też lokalizacya czynników górotwórczych w obrębie samych gór nie jest uzasadniona. O ile zaś ma charakter pozytywny, tj. twierdzący że jakość wnętrza ziemi oraz siły z niego pochodzące muszą się odbić w kształtach powierzchni, temu oczywiście nikt nie będzie zaprzeczał, ale też nic nie zyskamy takim powiedzeniem, dopóki bliżej rodzaju tych sił oraz mechanizmu całego zjawiska blizej nie określimy. Hipoteza kontrakcyjna przynajmniej tę posiada zaletę, że jasno i zrozumiale określa ów wewnętrzny mechanizm. Pozostaje zatem rezultat mało zadowalniający: że wydany przez autora potępiający wyrok o teoryi

kontrakcyjnej, na podstawie błędnej mechaniczno-teoretycznej dedukcyi, jest zupełnie bezpodstawny, oraz że własne jego domysły teoretyczne sprawy ani o krok dalej nie posuwają.

Mimo że zarzuty podniesione przez A m p f e r e r a przeciwko teoryi kontrakcyjnej są zupełnie niesłuszne, nie uważam tej teoryi bynajmniej za pewnik niewzruszony i dlatego chciałbym jeszcze, niezależnie od owej pracy, poruszyć kwestyę jej uprawnienia ze stanowiska dzisiejszej fizyki. Wypada tu przedewszystkim zaznaczyć trudności, na które ta teorya napotyka w obec całkiem innego rodzaju zjawisk, tj. w obec odkrycia ciał promieniotwórczych, które już w innych działach nauki spowodowały tyle przewrotów. Teorya kontrakcyjna jest ściśle związana z teoryą K a n t L a p l a c e'a o stygnięciu płynnej niegdyś masy naszej planety teoryi, która zdawała się do niedawna tak pewną, że mogła służyć jako fundament wszelkich spekulacyi geofizycznych. O słuszności tej podstawowej hipotezy nikt nie wątpił, dyskusya dotyczyła tylko kwestyi raczej ilościowych: czy spółczynnik przewodnictwa cieplnego głębszych warstw nie jest większy, niż warstw powierzchownych, czy zatem „wiek ziemi" liczyć należy według K e l w i n a na 40 milionów czy też na 200 milionów lat; czy pewniejsza jest K e l w i n a metoda rachunku czy inne (np. R u d z k i e g o); czy powierzchnia neutralna *(level of no strain)*, oddzielająca zewnętrzne warstwy zgniatane od wewnętrznych rozciąganych, znajduje się w większej czy mniejszej głębokości; czy punkt topliwości skał we wnętrzu zostaje osiągnięty czy nie, to znaczy, czy wnętrze jest stałe, czy płynne, albo może gazowe, a zatem czy miarą kurczenia ziemi będą spółczynniki rozszerzalności termicznej znanych nam ciał stałych, czy może należy kurczenie osądzać według zmian objętości przy krzepnięciu, itp. Ale nikt temu zaprzeczyć nie śmiał, że się odbywa zjawisko kurczenia, które może być źródłem kolosalnych sił górotwórczych.

Tymczasem dzisiaj zachwiała się najważniejsza podpora teoryi o ciekłym niegdyś stanie całej ziemi a nawet powstaje pytanie, czy ziemia w ogóle stygnie? Dowodem stygnięcia był wzrost temperatury ku wnętrzu; musi on być połączony

z przewodzeniem ciepła ku powierzchni, a nie mogąc sobie wyobrazić żadnego źródła, wytwarzającego wewnętrzne ciepło, było się zmuszonym do wniosku, że ziemia stygnie. Obecnie zaś wiemy, że istnieje takie źródło ciepła, a nawet bardzo obfite: ciała promieniotwórcze. Każdy gram radu (wraz ze swymi produktami transformacyi) wytwarza samodzielnie 0·0373 kaloryi ciepła na sekundę[1]). Cała ilość ciepła utraconego przez ziemię na sekundę wynosi: $4\pi k R^2 . \frac{d\Theta}{dr}$ (gdzie k jest przewodnictwo cieplne. dla granitu $k = 0{\cdot}008$; $\frac{d\Theta}{dr}$ — gradient temperatury $= \frac{1}{3000}$; R — promień ziemi w *cm*). Gdyby zatem każdy gram kuli ziemskiej zawierał tylko 6.10^{-14} g. radu, już cała utrata ciepła byłaby skompensowana. Tymczasem Strutt (1906) znalazł w najróżniejszych skałach wybuchowych i pierwotnych zawartości rzędu $0{\cdot}6.10^{-12}$ aż do $9{\cdot}6.10^{-12}$, w skałach osadowych $0{\cdot}25.10^{-12}$ do $5{\cdot}8.10^{-12}$ g. Świeżo znów J. J. Duplin ogłosił ciekawy materyał doświadczalny, według którego różnego rodzaju gneissy, granity, skały wybuchowe posiadają zawartości $4{\cdot}1—7{\cdot}6.10^{-12}$, woda morska tylko $0{\cdot}016.10^{-12}$, ale za to zawartość radu w osadach głębokomorskich muł (czerwony i radyolariowy) dosięga olbrzymiej wartości 35.10^{-12} g. radu na 1 gram substancyi.

Przyjmując według Dupina liczbę $4{\cdot}7.10^{-12}$ g jako przeciętną zawartość skał wewnętrznych, znalazłoby się, że już grubość 55 *km* takich skał wystarczyłaby do skompensowania całej utraty ciepła na zewnątrz, nawet gdyby całe pozostające jądro nie zawierało śladu radu. Temperatura wzrastałaby ku wnętrzu parabolicznie, a od owej głębokości począwszy miałaby (w całem wnętrzu) wartość koło 1000^0. Gdyby zaś grubość warstw radionośnych była większa, musiałoby nastąpić nie stygnięcie lecz ogrzewanie się ziemi! Przyjęcie takie, że ziemia znajduje się w stadyum powolnego ogrzewania, wydaje się nam nieprawdopodobne. Jakże wyjść z tej trudności? Nie mamy po-

---

[1]) Liczba ta nie uwzględnia cieplnego efektu promieni γ, który jest znaczny, ale nie dokładnie znany. Są to promienie bardzo przenikliwe, więc niewiadomo o ile w owych zjawiskach udział biorą jako źródło ciepła. Przyczynia się to znacznie do niepewności tego rodzaju obliczeń.

wodu do przypuszczenia, że zawartość radu dawniej była inna, gdyż rad wprawdzie z czasem się rozkłada, ale z drugiej strony znów ciągle nanowo się wytwarza, tak że w długich okresach czasu pewien stan równowagi musi się ustalić. Czy przyjąć chyba, że uran i rad znajdują się tylko w wewnętrznych warstwach, że n. p. pochodzą od meteorytów? To byłaby wymówka wygodna, ale wyglądająca bardzo na hipotezę umyślnie *ad hoc* stworzoną; a przeciwko niej przemawiałby też fakt, że według dotychczasowych pomiarów meteoryty posiadają mniejszą zawartość radu, niż skały ziemskie.

W każdym razie nawet, jeżeli przychylimy się do tego rodzaju wytłómaczeń, przyznać trzeba, że produkcya cieplna radu jest czynnikiem pierwszorzędnym w termicznej gospodarce ciała ziemskiego, który zatem także przy wywołaniu sił górotwórczych może odgrywać ogromną rolę. Lokalne anomalie w zawartości substancyi promieniotwórczych mogą mieć skutki wiele donioślejsze niż n. p. owe drobne czynniki, które Mellard Readowi nasunęły myśl teoryi ekspansyjnej[1]).

Jest to pole nieskończone do mniej lub więcej dowolnych spekulacyi, ale dopóki nie zostanie rozwiązane zagadnienie: jaka jest i jaka była zawartość ciał promieniotwórczych w ziemi? dopóty wszelkie tego rodzaju dedukcyjne teorye górotwórcze — między niemi także dawna teorya kontrakcyjna — pozostaną chwiejnemi nieuzasadnionemi hipotezami.

Jako ciekawy przykład takich spekulacyi, wyróżniający się ścisłością i poprawnością rozumowania, ale mojem zdaniem mimo to nie zasługujący na większe zaufanie z powodu chwiejności samych podstaw, przytoczę poglądy wyłuszczone przez F. v. Wolffa w pracy „Die vulkanische Kraft und die radioaktiven Vorgänge in der Erde“ [Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges. **60**, 431—465 (1908)]. Wolff jest zwolennikiem teoryi wulkanizmu Richthofena i Stübla, według której źródłem energii

[1]) Słusznie podnosi V. d. Borne w artykule: „Die physikalischen Grundlagen der tektonischen Theorien“ [Beiträge z Geophysik **9**, 378—403 (1908)], że zamiast dotychczas przyjmowanego koncentrycznego układu temperatury może w rzeczywistości istnieć wielka rozmaitość. Praca ta zawiera dużo słusznych uwag, ale nie sądzę, żeby tam wyluszczona zasada „minimalnej wartości pracy tektonicznej“ cokolwiek nam pomóc mogła w rozwiązaniu kwestyi tektonicznych.

w zjawiskach wulkanicznych miałoby być powiększenie objętości, występujące przy krzepnięciu magmy wulkanicznej. Ponieważ jednak eksperymentalnie stwierdzono, np. przez Barusa, że skały wulkaniczne w zwykłych warunkach się zachowują przeciwnie, t. j. nie rozszerzają lecz kurczą się przy krzepnięciu (jak wszystkie inne ciała z wyjątkiem wody i bizmutu), przeto Wolf ucieka się do hipotezy Tammanna o wpływie ciśnienia na to zjawisko. Według tejże ciała zachowują się wprawdzie tak w stanie normalnym tj. przy ciśnieniu atmosferycznem; przy wyższych ciśnieniach zaś owo kurczenie byłoby mniejsze, a powyżej pewnej granicznej wartości (którą np. Wolff przyjmuje dla skał jako 40000 atm., w głębokości 150 *km.*) zamiast kurczenia występowałoby rozszerzenie przy krzepnięciu. W głębokościach większych magma zachowywałaby się zatem tak, jak to przyjmuje owa teorya wulkanizmu.

Owa hipoteza Tammanna, nawiasem mówiąc, wydaje się wprawdzie z różnych powodów dość prawdopodobną, ale zawsze polega tylko na śmiałej ekstrapolacyi wyników empirycznych, osiągniętych przy niższych ciśnieniach, i bynajmniej jako pewnik uważaną być nie może, a tem więcej liczby przyjęte przez Wolffa polegają na bardzo chwiejnych podstawach. Ale przyjąwszy owe założenia trzeba jeszcze rozważyć, czy właśnie w głębokościach większych niż 150 *km* będzie się odbywać krzepnięcie, gdyż owa teorya stałaby się oczywiście bezprzedmiotową, gdyby np. cała kula ziemska była skrzepnięta lub gdyby całe wnętrze było ciekłe i pokryte skorupą cieńszą od 150 *km.*

Część pracy, odnosząca się do stanu skupienia wnętrza ziemi, tu nas najbardziej interesuje. Zasadnicze założenie Wolffa jest to, że ziemia wprawdzie stygnie, ale przeważną część ciepła, utraconego na zewnątrz, kompensuje przez produkcyę cieplną radu; w końcowych obliczeniach zaś wprost przyjmuje, że te czynniki się równoważą, tak że rozkład temperatury z czasem się nie zmienia. Autor musi zatem przyjąć, zgodnie z tem co powyżej zaznaczono, że zewnętrzne, silnie radonośne warstwy sięgają tylko do stosunkowo niewielkiej głębokości. Fundamentalny problem zaś, skąd by pochodzić mogło takie nagromadzenie radu w zewnętrznych warstwach,

a zupełne pozbawienie całego wnętrza, autor usiłuje rozwiązać przez przyjęcie hipotezy, że promieniotwórczość ciał zależy od ciśnienia, któremu one podlegają, a mianowicie, że maleje z rosnącem ciśnieniem. Wolff przyjmuje zatem że cała ziemia zawiera owe substancye, ale że zjawisko promieniotwórczości związane z produkcyą ciepła, odbywać się może tylko tam gdzie ciśnienie jest stosunkowo małe, t. j. w zewnętrznych warstwach.

Przyjąwszy takie hipotezy można już łatwym sposobem obliczyć rozkład temperatury. Musiałaby ona wzrastać stopniowo z głębokością w obrębie warstw radioaktywnych, a w większej głębokości miałaby już stałą wartość (np. 1200^0 w razie zawartości $7{\cdot}28.10^{-12}$ g, 800^0 w — razie zawartości $11{\cdot}0.10^{-12}$ g na 1 cm^3). Zależnie od zawartości radowej trzebaby teraz rozróżnić trzy możliwości: 1) Jeżeli zawartość jest większa od $8{\cdot}0.10^{-12}$, w takim razie temperatura wewnętrzna jest stosunkowo nizka; stała skorupa musi mieć grubość znacznie większą niż 150 *km*; może — czego autor nie zaznacza wyraźnie — także całe wnętrze być w stanie stałym. 2) Jeżeli zawartość radu jest mniejsza od 8·0, a większa od 7·6, w takim razie w głębokości od jakich 50 do 150 *km* istniałaby warstwa ciekłej magmy, poniżej znów skorupa stała, może grubości 100 *km*, a wnętrze byłoby ciekłe. 3) W razie zawartości mniejszej niż 7·6, będziemy mieć zewnętrzną skorupę stałą, o grubości przeszło 70 *km*, a całe wnętrze będzie ciekłe. Wolff oświadcza się za drugim przypadkiem, a to z różnych powodów, których już tu dyskutować nie będziemy, gdyż później do tego przedmiotu powracamy. Krzepnięcie magmy na wewnętrznej powierzchni wewnętrznej skorupy stałej (zatem w głębokościach rzędu 200 *km*) byłoby owem domniemanem źródłem sił wulkanicznych.

Rozważmy uprawnienie tej teoryi. Argumentacyom rachunkowym nic zarzucić nie można, z wyjątkiem że się opierają na zbyt chwiejnych podstawach! Przedewszystkiem hipoteza, że promieniotwórczość zanika przy użyciu wysokiego ciśnienia, nie jest niczem udowodniona. Przeciwnie, wiemy że promieniotwórczość jest właściwością atomową, i to według dotychczasowych badań doświadczalnych najzupełniej niezależną od warunków zewnętrznych, mianowicie też niezależna

od temperatury. Zdaje się, że nie wykonano jeszcze pomiarów przy użyciu ogromnych ciśnień, ale według tego co dotychczas stwierdzono musimy uważać ową hipotezę o wpływie ciśnienia za nadzwyczaj nieprawdopodobną.

W związku z tem jest najzupełniej dowolne przyjęcie, że promieniotwórczość zewnętrznych warstw jest wszędzie jednakowa, a wewnętrznych ściśle równa zeru. Z równem prawem możnaby przyjąć najróżniejsze inne rodzaje rozkładu, któreby powodowały odmienne układy temperatury i któreby np. wykluczały możliwość przypadku (2). Nie jesteśmy też niczem uprawnieni do przyjęcia podstawy rachunkowej, że rozkład temperatury jest niezmienny z czasem i odpowiada równowadze termicznej.

Krótko mówiąc udało się autorowi tylko udowodnić, że jego teorya, wyrażona przypadkiem (2), nie jest *apriori* niemożliwa, ale zdaje się, że jest ona zupełnie nieprawdopodobna. Pytanie zresztą, czy wielka z niej byłaby korzyść dla teoryi wulkanizmu, gdyż zewnętrzne warstwy w każdym razie szybciej stygną od wewnętrznych, więc kurczenie się zewnętrznej magmy krzepnącej musiałoby pokrywać rozszerzenie się wewnętrznej magmy krzepnącej.

Do rozstrzygnięcia kwestyi, czy wnętrze ziemi jest ciekłe czy stałe, i kwestyi rodzaju sił górotwórczych takie rozważania zatem nic się nie przyczyniają, bo właśnie nie znamy dat podstawowych. Spekulacye tego rodzaju są bardzo ciekawe, ale wynik ich jest rozczarowujący, gdyż brak nam podstaw do rozstrzygnięcia między najróżniejszemi możliwościami.

Wracając do teoryi kontrakcyjnej, to zdaje się rzeczą pewną, że musi ona doznać pewnych modyfikacyi dla uwzględnienia termicznych wpływów promieniotwórczości, ale jak daleko te zmiany sięgają — czy nawet należy przypuścić miejscowe ogrzanie i dylatacyę zamiast kontrakcyi, — to zapewne jeszcze długo pozostanie kwestyą nierozstrzygniętą. Ale sądzę, że mimo to pozostaje w obrębie teoryi górotwórczych pewne pole do badań teoretyczno-fizycznych. Ograniczając się mianowicie do faktu, że powstać mogą ogromne naprężenia w skorupie ziemskiej, i nie wchodząc na razie bliżej w analizę ich pochodzenia, możemy się jednak starać, żeby dojść przynajmniej do zrozumienia szczegółowego mechanizmu powstawania

różnych zjawisk tektonicznych wskutek takich sił. Takim sposobem o siłach na odwrót będzie można wnioskować z symptomatów obserwowanych.

Podstawą tych badań musi być oczywiście teorya wytrzymałości. Chcąc ją jednak zastosować do skorupy ziemskiej, znowu spotykamy się z właśnie poruszonemi trudnościami w zmienionej formie, gdyż podstawowym warunkiem rozwiązania tego rodzaju zagadnień jest znajomość sposobu, jak skorupa zewnętrzna jest połączona z jądrem, oraz znajomość mechanicznych właściwości tegoż. Nie można obejść tej trudności, tak jak to Ampferer próbował, wyobrażając sobie skorupę jako puste sklepienie, nie można jej też rozwiązać rachunkami w rodzaju poprzednio omawianego, tylko trzeba się oprzeć na geofizycznych badaniach doświadczalnych.

Obecny stan tej kwestyi można streścić w następujący sposób. Czy wnętrze ziemi znajduje się w stałym, ciekłym lub gazowym stanie skupienia, o tem żadnego pojęcia nie mamy — jeżeli owych słów używamy dla rozróżnienia termodynamicznego stanów skupienia — gdyż żadnej wskazówki nie posiadamy co do temperatur tam panujących. Hipotezy o jądrze złożonem z dysocyowanych gazów (Günther, Geophysik 1, 360—361), o temperaturach dosięgających 100000° (Ritter Arrhenius) itp. są to fantazye bez żadnych naukowych podstaw. Jedynie co do właściwości mechanicznych wnętrza możemy pewne wnioski wyciągnąć, i w tym sensie będziemy używać słowa „stały“ lub „ciekły“, dla oznaczenia sprężystości postaciowej lub płynności. Określenia termodynamiczne i mechaniczne nie są identyczne, gdyż jest to rzeczą bardzo możliwą, że nawet gazy powyżej temperatury krytycznej okazują właściwości ciał stałych, gdy zostają skomprymowane przez kolosalne ciśnienie. Wskazuje na to wzrost lepkości zgęszczonych gazów i cieczy przy powiększeniu ciśnienia.

W tym sensie powiedzieć można, że dawną teoryę ciekłego wnętrza dzisiaj porzucić trzeba jako stanowczo błędną. Broni jej wprawdzie jeszcze zawsze z równą zaciętością O. Fisher, ale zapatrywań jego nikt chyba z dzisiejszych badaczy na polu geofizyki nie podziela. Jak wiadomo, Lord-Kelvin i G. H. Darwin wskazali na jeden ze składników przypływu i odpływu morza, t. zw. czternastodniowy przypływ i odpływ,

jako dowód stałości wnętrza, ponieważ wielkość jego w razie ciekłego wnętrza musiałaby być bez porównania mniejsza, niż w rzeczywistości Długoletnia dyskusya, *pro* i *contra* nad tym przedmiotem została obecnie zakończona pracą Rayleigha [Philos. Mag. **5**, 136 (1903)] z której wynika, że ów argument jest całkiem słuszny[1]. Stwierdza się zatem także liczbowy wynik obliczeń owych badaczy, mianowicie, że sprężystość kuli ziemskiej musi być wielkością tego rzędu co sprężystość stali.

Zgadzają się z takiem określeniem obserwacye odkształceń ziemi, a wskutek tego zmian kierunku pionu, wywołanych przyciąganiem księżyca, [Hecker (1907)], a podobne albo nawet większe wartości sztywności wynikają z zjawiska nutacyi Eulerowskiej, tj. peryodycznych przesunięć osi obrotu ziemi, powodujących wahanie szerokości geograficznej w okresie 430 dniowym[2].

Jeszcze namacalniejszego dowodu dostarczyła nowoczesna seismologia, wykazując, że przez ciało ziemi przechodzą nie tylko fale podłużne, charakterystyczne dla ciał ciekłych i gazowych (pierwsza faza wstępna „erste Vorläufer“), ale także fale poprzeczne, czyli raczej torsyonalne (druga faza wstępna, zweite Vorläufer), które dowodzą sprężystości postaciowej materyału, cechującej stały stan skupienia. Zdaje się, że w ogóle seismologia w pierwszym rzędzie jest powołana do dostarczenia nam wiadomości co do mechanicznych właściwości wnętrza ziemi, gdyż jej eksperymenta sięgają do dowolnych głębokości, a liczba ich jest nieograniczona[3].

Zdawałoby się zatem że powinniśmy przyjąć teoryę skrajnie przeciwną do tamtej: że ziemia jest ciałem całkowicie stałem i sprężystem. Jednak także przeciwko takiemu przypuszczeniu podnoszą się poważne wątpliwości. Jakby w takim razie wytłómaczyć owe dawne zjawisko kompensacyi siły ciężkości, dowodzące, że na górach i w głębinach i na morzach, wszędzie

---

[1] Patrz referat G. H. Darwina w Encyklopädie d. math. Wiss. VI, (B), 61.

[2] Patrz n. p. Rudzki; Teorya fizycznego stanu kuli ziemskiej: Rozp. Akad. Krak. **37**, 225—420 (1900).

[3] Dobre zestawienia nowszych wyników: Wiechert: Ph. Ztf. **9**, 36 (1908); Láska: Natur und Offenbarung **54** (1908).

mniej więcej równa ilość masy przypada na każdy element powierzchni ziemskiej. Wszak to znaczy, że wszystkie części skorupy ziemskiej znajdują się w równowadze *quasi* hydrostatycznej, jakby kry lodu na wodzie płynące, i to pomimo że istniały procesy górotwórcze, które niegdyś tę równowagę zakłócały, pomimo że wypiętrzyły one Himalaye i utworzyły głębie oceaniczne. Byłoby to zupełnie niezrozumiałe, gdyby ciało ziemi nie dostosywało się z czasem do nierówności nacisku.

Sądzę, że poważny argument przeciwko sztywności całego ciała ziemskiego stanowią też owe tak często w różnych stronach napotykane góry fałdowe. Nikt chyba nie przypuści, żeby przyczyną fałdowania były siły pionowe, z wnętrza ziemi pochodzące i rozmieszczone regularnie okresowo, działając ku górze w miejscach grzbietów, a ku dołowi w łękach. Naturalne wytłumaczenie, przez wszystkich dotychczas przyjmowane jest to, że powstało ono przez zgniecenie skorupy w kierunku poziomym, tak jak powstają fałdy na obrusie. Jest to w związku z owem już poprzednio poruszonem, znanem zagadnieniem z teoryi sprężytostości, rozwiązanem przez Eulera, według którego pręt długi a cienki, zgniatany przez siłę w kierunku jego długości działającą, przyjąć może pod pewnymi warunkami kształt krzywej falistej, t. zw. *elastica*. W teoryi sprężystości udowodniono [Bryan, Cambr. Phil. S. Proc. 6, 199 (1889)], że tego rodzaju zjawiska powstać mogą jedynie w cienkich prętach lub cienkich płytach, nie zaś w ciele masywnem o trzech wymiarach równorzędnych. Skorupa ziemska nie może być zatem „zrosła" z wnętrzem, nie może tworzyć z nim razem jednolitej sprężystej masy, lecz musi być od wnętrza w pewien sposób oddzielona — tak jak nie powstaną fałdy w obrusie, jeżeli jest do stołu przyklejony, tylko jeżeli może się ślizgać po jego powierzchni. Obydwa właśnie omawiane zjawiska wyjaśniłyby się najzupełniej na podstawie owej hipotezy o istnieniu cienkiej sztywnej skorupy na płynnem jądrze — którą jednak zmuszeni byliśmy porzucić. Jak pogodzić te sprzeczności?

Należy tu przedewszystkiem wymienić teoryę, według której zewnętrzna skorupa ziemska, o grubości jakich 40 *km*, byłaby oddzielona od stałego jądra wewnętrznego przez warstwę ciekłej magmy. Zwolennicy tej teoryi powołują się na okres

głównych fal seismicznych, wynoszący zwykle 18—20 sek., który interpretują jako czas drgania głównego (w kierunku poziomym) owej zewnętrznej skorupy (Wiechert, Milne). Nie tu miejsce na szczegółowe roztrząsanie tych kwestyi, sądzę jednak, że dałoby się to też inaczej wytłómaczyć, aniżeli przez przyjęcie owej warstwy ciekłej. A przyznać trzeba, że istnienie nawet stosunkowo cienkiej warstwy ciekłej nie łatwo pogodzić z owymi zarzutami, które przeciwko teoryi ciekłego wnętrza podniesiono.

Czyżby przyjąć n. p. tak ogromną lepkość owej magmy, żeby nawet w okresie 14 dniowym nie zdołała się dostosować do zjawiska przypływu i odpływu? Byłoby to już przejście do teoryi w dalszym ciągu wyłożonej, a różniące się w takim razie tylko pod względem ilościowym. Pozostają jednak trudności w obec innych poprzednio wspomnianych zjawisk.

Dopóki te kwestye nie zostaną wyjaśnione zupełnie zadowalająco, zdaje się wiele racyonalniej trzymać się teoryi wyznawanej przez „viscidistów". Teorya ta godzi wszystkie owe fakty jako objawy sprężystości stałego wnętrza ziemskiego, złagodzonej pewnym stopniem plastyczności. W takim razie bowiem wobec sił krótko trwałych ziemia musiałaby się zachowywać jak ciało stałe, sprężyste. Z drugiej strony zaś dzisiejsze nasze wiadomości o właściwościach plastycznych ciał stałych, jakkolwiek nie wyczerpujące, przecież uprawniają nas do wniosku, że skorupa zewnętrzna nawet w razie gdyby ziemia była całkowicie stała, wobec długotrwałych sił górotwórczych tak by się musiała zachowywać jak gdyby spoczywała na ciekłem jądrze. Dokładne zbadanie mechanicznych właściwości ciał stałych jest oczywiście podstawą dla wyjaśnienia tej sprawy, jak i w ogóle dla jakichkolwiek spekulacyi na polu mechaniki tektonicznej. Dlatego niech mi będzie wolno podać na tem miejscu sprawozdanie o kilku nowszych badaniach na tem polu, zwłaszcza, że obchodzą one nas także ze względu na teoryę Schardt-Lugeona, którą później poruszymy.

Zacznijmy od kwestyi wytrzymałości. Wiadomo że w Anglii i Ameryce technicy trzymają się reguły (podanej przez Poissona i Lamé'go), że złamanie następuje, gdy siła ciągnąca (lub cisnąca) przekracza pewną maksymalną wartość; w Niem-

czech i Francyi zaś (według Ponceleta, St. Venanta, Grasshofa) jako kryteryum wytrzymałości przeważnie uważają wartość maksymalnego wydłużenia (lub skrócenia). Nie są to warunki identyczne, ponieważ wydłużenie zależy nie tylko od siły w odpowiednim kierunku ciągnącej, ale także od sił poprzecznych. Tymczasem niewątpliwie jedna i druga teorya są najzupełniej błędne, i zdaje się, że wytrzymałość zależy w rzeczywistości przedewszystkiem od wartości maksymalnego skręcenia (Scheerung), t. j. od zmiany kątów, czyli co mniejwięcej na to samo wychodzi, od różnicy największego i najmniejszego napięcia panującego w danem miejscu, a nie od bezwzględnych wartości tychże. Teoryę tę wygłosił po raz pierwszy Coulomb, a następnie za nią przemawiali Tresca i G. H. Darwin. Pewną modyfikacyę jej, matematycznie wydoskonaloną i uogólnioną, tworzy także teorya Mohra (1882). Dopiero ostatnie dziesięciolecie dostarczyło jednak, w pracach Voigta (1899) i innych, dowodów doświadczalnych, zbijających stanowczo owe dwie teorye i sprzyjających tej trzeciej[1]). Tym doświadczeniom można jeszcze zarzucić, że dotyczyły one tylko takich ciał jak kryształy soli kamiennej lub stopy parafiny, stearyny itp., ale później Föppl, używając materyałów technicznych (metali, kamieni), do podobnych doszedł wyników. Zwłaszcza jednak liczne próby nad wytrzymałością różnych materyałów świeżo wykonane przez amerykańskich techników (Hancock, Guest, Scoble), oraz precyzyjna praca Williamsa (1908) przyczyniają się bardzo do poparcia tej teoryi.

Dla ilustracyi różnicy tych teoryi przytoczę jedno z doświadczeń Williamsa. Skonstatował on, że pewien drut aluminowy przerywa się (na wolnem powietrzu) przy obciążeniu 13·6 *kg* na mm^2. Następnie w naczyniu gdzie był zawieszony, wytworzył ciśnienie hydrostatyczne 700 atmosfer, to znaczy 7 *kg* na mm^2. Gdyby więc teorya Poissona lub Ponceleta była słuszna, potrzebaby wtedy obciążenia 13·6 + 7 = 20·7 *kg* do przerwania, tymczasem drut się przerwał przy obciążeniu

---

[1]) Voigt sam żadnej z owych teoryi nie przyjmuje i wskazuje na pewne sprzeczności ich z doświadczeniami. Zdaje się, że tu jednak chodzi o różnice drugorzędne; powyższa teorya zapewne nie jest precyzyjnie ścisła, ale przecież w zadowalający sposób oddaje główne rysy zjawiska.

13·8 *kg* to znaczy, że owe równomierne ciśnienie hydrostatyczne żadnego wpływu nie miało. Zgadza się to oczywiście z teoryą Coulomba, gdyż takie równomierne ciśnienie nie mogło zmienić różnicy napięcia w kierunku osi drutu i w kierunku prostopadłym.

W zwykłych warunkach doświadczeń technicznych różnice owych teoryi nie są bardzo wybitne, ale wzrastają one kolosalnie, gdy chodzi o ciśnienie ziemskie, i stąd wynikają ważne konsekwencye dla geofizyki. Wytrzymałość granitu określiliśmy na samym początku powiedzeniem, że słup wysokości większej niż 3 570 *m* zgniata swą podstawę. Gdyby zatem reguła Poissona przyjęta w technice była ważna, to w głębokości większej niż 3 570 *m* granit już w stanie normalnym musiałby być wszędzie na pył zmiażdżony i taki sam też musiałby być stan całego wnętrza ziemi.

Takie istotnie było n. p. zdanie Heima i na tej podstawie wybudował swoją znaną teoryę „des latent plastischen Zustandes". Heim uważa to wprost za rzecz oczywistą, „eine logische Forderung" [1]), że ciało będące pod wszechstronnem ciśnieniem przewyższającem granicę wytrzymałości musi się zachowywać tak, że dalsze siły nie spowodują złamania lecz tylko odkształcenie, podobnie jak w cieczy bardzo lepkiej. A głębokość do tego potrzebną ocenia na tylko 2600 *m*! Tymczasem widzimy, że upada podstawa tej teoryi, gdyż ciała wskutek wszechstronnego równomiernego ciśnienia wogóle nie mogą zostać rozkruszone [2]). Pokazuje się, że w rzeczywistości bezwzględna wartość ciśnienia jest obojętna i tylko różnica natężenia działającego w kierunku pionowym a poziomym będzie miarodajna. W stanie normalnym, nienaprężonym, gdy rozkład ciśnienia odpowiada prawom ciśnienia hydrostatycznego, różnica ta jest zero, więc wtedy nie ma mowy o przekroczeniu granicy wytrzymałości, i wogóle owo ciśnienie „grawita-

---

[1]) Heim: Ü. d. Mechanismus d. Gesteinsumformung bei Gebirgsbildung (Ztf. d. d. geolog. Ges. **32**, 262).

[2]) Bezpośrednie dowody doświadczalne np. u Voigta i Föppla. Trudność takich doświadczeń polega na wytworzeniu naprężenia całkiem równomiernego. Jeżeli ciało jest nie całkiem jednorodne, może pęknąć wskutek wewnętrznych naprężeń.

cyjne“ żadnej pod tym względem roli nie odgrywa. Jeżeli wskutek jakichbądź przyczyn (zmian objętości) powstaną dodatkowe naprężenia dostatecznie wielkie, może się zdarzyć pęknięcie, tylko to zjawisko w takich głębokościach o tyle będzie się różniło od złamania w zwykłych warunkach na powierzchni ziemi, że tam części pęknięte mogą się przesunąć w kierunku stycznym, ale nie mogą się rozsunąć, gdyż powstanie szczelin tam jest niemożliwe. Prócz tego owe przesunięcia styczne będą utrudnione wskutek tarcia, rosnącego wraz z naciskiem, tak że istotnie zjawiska naturalnej plastyczności w wyższym stopniu będą mogły się uwydatnić. Teoryę Heima musimy więc dzisiaj porzucić jako błędną, ale mimo to zasadniczą myśl jej, tj. wzrost plastyczności w głębszych warstwach, uznamy w dalszym ciągu za zupełnie słuszną, choć pod względem ilościowym wzrost ten będzie znacznie mniejszy, niżby z owej teoryi wynikało.

W związku z tem jest następująca kwestya. Powiedzieliśmy, że największa możliwa wysokość słupa granitu wynosi 3570 *m.*, a odnośne liczby dla wapienia, piaskowca i t. p. byłyby jeszcze mniejsze. Wszak jednak istnieją góry wysokości 8800 *m*, a jeszcze większe głębie oceanowe? Pfaff to niegdyś podniósł jako zarzut przeciwko teoryi Heima, i nie sądzę żeby Heima odpowiedź (l. c.) była zupełnie zadowalająca, gdyż byłoby to istotnie niewytłómaczalne według dawnych kryteryów wytrzymałości.

Obecnie zaś to łatwo zrozumiemy: ponieważ owe góry nie mają kształtów słupów pryzmatycznych. Pionowe ściany o większej wysokości lub szczeliny o większej głębokości są niemożliwe, ale rzecz się zmienia zupełnie, gdy chodzi o górę o stokach łagodniej nachylonych. Te boczne stoki tworzą jakoby obręcz wstrzymującą średnią część od rozpadnięcia się; wywierają one ciśnienie ku środkowi góry, w kierunku poziomym skierowane, i tylko gdyby różnica tego ciśnienia a ciśnienia pionowego przekroczyła wytrzymałość, nastąpiłoby pęknięcie. Możliwość istnienia gór wyższych, niż owa granica będzie zatem zależna od nachylenia stoków i widzimy, że w samym fakcie istnienia ich, nie ma nic sprzecznego z zasadami wytrzymałości.

W zastosowaniu danych wytrzymałości do głębszych

warstw trzeba zauważyć, że wytrzymałość prawdopodobnie do pewnego stopnia zależeć będzie od ciśnienia, co Mohr w swojej teoryi uwzględnił. Zależność ta nie jest jeszcze znana, ale zdaje się według poprzednio wspomnianych pomiarów Voigta i Williamsa, że wpływ ciśnienia jest bardzo nieznaczny. Natomiast od dawna wiemy z codziennej praktyki, że wytrzymałość w znacznej mierze zależy od temperatury, a mianowicie, że zmniejsza się z rosnącą temperaturą. Wszak w temperaturze topliwości wytrzymałość spada do zera, gdyż ciecze zmianom postaci nie przeciwstawiają żadnej siły sprężystej. Niestety nie posiadamy jeszcze danych doświadczalnych, żeby liczbowo móc ocenić odnośne stosunki u materyałów skalnych, coby pewne znaczenie miało dla problemów tektonicznych, tylko tyle można powiedzieć, że w głębokości jakich 30 *km* wytrzymałość będzie tylko małym ułamkiem wytrzymałości normalnej, na powierzchni ziemi.

W czem głębsze warstwy jednak postępujemy, tem ważniejszą rolę — w porównaniu z kwestyą wytrzymałości — odgrywać będzie inne zjawisko: plastyczność skał. Tem zjawiskiem obecnie się zajmiemy. Stopień plastyczności określamy we fizyce za Maxwellem t. zw. czasem relaksacyi. Wyobraźmy sobie np. walcowaty kawał smoły, który nagle o pewien drobny ułamek długości rozciągamy i następnie w tym stanie pozostawiamy. W pierwszej chwili przeciwstawia takiemu wydłużeniu odpowiednią siłę sprężystości, z czasem jednak ta siła maleje, czyli smoła przystosowuje się stopniowo do wymuszonej na niej deformacyi. Przeciąg czasu, w którym siła owa spadnie do $\frac{1}{2{\cdot}7}$ części swej pierwotnej wielkości, nazywamy czasem relaksacyi, czyli czasem zluźniania. Do pomiarów nadaje się lepiej inny sposób wykonania tego doświadczenia, mianowicie przyczepienie stałej siły wydłużającej do owego kawałka i spowodowanie tak wciąż rosnącego wydłużenia. Będzie ono tem szybciej postępować (dla danej siły), czyli ciało będzie tem plastyczniejsze, czem krótszy ów czas relaksacyi i czem mniejsza odporność sprężysta, albo obejmując te dwa czynniki jednem pojęciem: czem mniejsze tarcie wewnętrzne.

Według teoryi kinetycznych przypuścić trzeba, że wszystkie ciała są do pewnego stopnia plastyczne i że różnice są

tylko ilościowe; co prawda, że w zwykłych warunkach niektóre ciała posiadają czas relaksacyi ogromny, przekraczający może setki tysięcy lat — te nazywamy dobrze sprężystemi np., stal, podczas gdy u ciał t. zw. miękkich jak wosk, parafina i t. p. czas zluźniania jest tak krótki, że trudno wogóle zwykłemi metodami statycznemi mierzyć ich sprężystość. Jako typowy przykład ciała łączącego właściwości sprężystości i plastyczności może właśnie posłużyć smoła, pękająca jak szkło przy nagłem zgięciu lub uderzeniu, a płynąca jak ciecz lepka pod wpływem sił długo trwających, jak np. własnego ciężaru.

Niestety ilościowych danych co do czasów relaksacyi posiadamy jeszcze bardzo mało, odnośne badania doświadczalne są dopiero w zaczątku, a także wypracowanie racyonalnej teoryi matematycznej tych zjawisk zostało niedawno dopiero podjęte [1]) i dużo tutaj pozostaje do zrobienia. Komplikuje się rzecz jeszcze tem, że plastyczność w pewnych razach zależy także od wielkości odkształcenia; nawet materyały w zwykłych warunkach prawie idealnie sprężyste, jak żelazo, mosiądz itd., stają się do pewnego stopnia plastyczne, gdy obciążenie przekracza pewną granicę, a przy osiągnięciu granicy wytrzymałości zluźnianie jest prawie natychmiastowe — to właśnie nazywamy złamaniem. Charakterystyczne są pod tym względem liczby otrzymane przez Tammanna i jego współpracowników [Ann. d. Phys. **10**, 647 (1903)] przy powtórzeniu — w nieco odmiennej a przydatniejszej do ścisłych pomiarów — formie słynnych doświadczeń francuza Tresca nad wypływaniem metali przeciskanych wskutek ogromnego ciśnienia przez otwory. Pokazują one, że wypływ różnych metali (jak cyna, bismut, tallium, ołów) przy użyciu ciśnienia 1000 atmosfer sto lub kilkaset razy szybciej postępował, niż przy użyciu ciśnienia 500 atmosfer.

To samo wynika z świeżo ogłoszonej pracy Dunstana [Phil. Mag. **17**, 192 (1909)] nad wyciąganiem drutów ołowianych i cynowych w zwykłej temperaturze. Spółczynnik tarcia wewnętrznego, który tym sposobem obliczyć zdołano, wynosił np. dla pewnego aliażu [98% Pb + 2% Sn] przy obciążeniu 66

---

[1]) Patrz prace Natansona i Zaremby w Rozpr. Akad. Krak. roczniki **41, 42, 43.**

atmosfer: $2 \cdot 2.10^{14}$; przy obciążeniu 175 atmosfer: $6 \cdot 3.10^{12}$. Tym nadzwyczajnym wzrostem plastyczności przy powiększeniu siły deformującej tłómaczy się niewątpliwie niejeden zadziwiający przykład podatności materyałów, które wobec mniejszych sił zachowują się zupełnie nieplastycznie. Dla porównania podamy jeszcze odpowiednie liczby dla smoły: $1 \cdot 3.10^{10}$ (temp. 15°, Trouton); gliceryny: 13.9 (temp. 14·3°); wody: 0·0102 (temp. 20°). Kalafonia posiada według Reigera w temperaturze 12° spółczynnik tarcia rzędu 10^{17}, terpentyna zaś 0·02; a wszystkie wartości pośrednie można otrzymać przez zmieszanie tych dwóch składników. Mieszaniny takie, posiadające spółczynnik mniejszy niż 10^7, robią wrażenie cieczy, gdyż rozpływają się dość szybko wskutek własnego ciężaru.

Skutek ogromnego wszechstronnego ciśnienia ilustrują dobitnie doświadczenia Rinne'go (1904) nad wykoszlawieniem kryształów soli lub sylwinu, oblanych stopionym ałunem, a następnie ściskanych w rurach miedzianych, a zwłaszcza obszerne wielostronne badania Springa [1]) nad spajaniem, zapomocą ogromnych ciśnień, proszków w jednolitą masę (zwłaszcza w pewnych razach przy udziale wilgoci), i nad tworzeniem tym sposobem aliażów oraz związków chemicznych. Trudno wprawdzie odróżnić, co z tego rodzaju zjawisk przypisać należy właściwej plastyczności w poprzednio określonym sensie, a co polega na pękaniu i rozkruszeniu się masy na drobne cząstki, na przesuwaniu się i następnem zrastaniu się ich w jednolitą (albo pozornie jednolitą) masę Takie zjawiska, które możnaby określić nazwą *quasi*-plastyczności, zapewne wybitnie występują w ciałach o strukturze ziarnistej lub drobno krystalicznej i dawno już Gümbel (1880) [2]) zwrócił uwagę na rolę, które one odgrywają w skałach. Wspomnieliśmy już poprzednio, że Heima teoryę o wpływie ciśnienia i wywołania stanu „latent plastisch“ dzisiaj musimy uznać za mylną. Czy zatem ciśnienie wszechstronne rzeczywiście powiększa plastyczność, czy też tylko działa przez spajanie rozłamanych cząstek, to jeszcze jest kwestya otwarta, ale dla geologii to rozróżnie-

---

[1]) Patrz n. p. sprawozdanie w Naturw. Rdschau **15**, 285 (1900).

[2]) Gümbel: Sitzungsber. Münch. Akad. d. W. **10**, 596 (1880) sprawozdanie prof. Zubera w Kosmosie **6**, 222 (1880).

nie jest dosyć obojętne. Faktem pozostanie, że przy użyciu wielkiego wszechstronnego ciśnienia także takie materyały mogą okazać przynajmniej pozorną plastyczność, któreby w zwykłych warunkach przy działaniu takich samych sił deformujących się rozkruszyły. Ciekawe wskazówki co do zjawisk powodujących ową *quasi*-plastyczność w ciałach drobno krystalicznych daje zwłaszcza praca Adamsa i Nicolsona [Proc. Roy. Soc. **67**, 228 (1900)] nad plastycznością marmuru, która się ujawnia przy użyciu większych ciśnień i powoduje płynięcie tej masy, zupełnie analogiczne do zjawisk występujących przy walcowaniu metali, prasowaniu ich w formy itp. Zresztą nawet w zwykłych warunkach marmur większą okazuje plastyczność, niż to zazwyczaj przypuszczamy, czego dowodem jest obserwacya L. Webera [Schriften d. naturw. Ver. f. Schleswig-Holstein **11**, 3 (1895)] nad płytą marmuru o rozmiarach $150 \times 50 \times 5$ *cm*, która w ciągu 17 lat się wygięła o 21 *mm*.

Czynnik, który w zjawiskach plastyczności najwybitniejszą rolę odgrywa, jest temperatura. Wszak n. p. technologia żelaza i szkła w znacznej części się opiera na podwyższeniu plastyczności przez ogrzanie, występuje u tych substancyi bardzo jaskrawo. Niestety i tutaj bardzo mało jeszcze posiadamy obserwacyi ilościowych. Wymienię pracę Riegera [Phys. Zeitschr. **2**, 213 (1901)], z której dla kalafonii obliczyć można następujące liczby plastyczności (odwrotności czasu relaksacyi):

w temperaturze:	12^0	30^0	40^0	55^0
plastyczność:	$2{\cdot}5.10^{-7}$	7.10^{-5}	$1{\cdot}4.10^{-3}$	$2{\cdot}5.10^{-2}$

Podobny kolosalny wzrost plastyczności z temperaturą skonstatował Heydweiller u stałego mentholu. Możnaby zarzucić, że są to ciała o nieco wyjątkowych własnościach. Reiger jednak pokazał, że szkło, które w zwykłej temperaturze jest typem ciała niepodatnego i kruchego, już nieco powyżej 300^0 okazuje wyraźne zjawiska plastyczności (czas relaksacyi rzędu wielkości 10^5). W nieco wyższych temperaturach Trouton i Andrews oznaczyli spółczynnik tarcia wewnętrznego; wynosi $1{\cdot}1.10^{13}$ w temp. 575^0; $2{\cdot}3.10^{11}$ w temp. 660^0; $4{\cdot}5.10^{10}$ w temp. 710^0; w tych temperaturach plastyczność szkła jest zatem już podobna jak u smoły. Równie wybitnie występuje

to zjawisko w poprzednio wspomnianych doświadczeniach Tammanna nad metalami. Jako przykład podamy liczby, określające w pewnem doświadczeniu nad ołowiem prędkości wypływu:

prędkość:	0·3	1·0	3·1	8·7	16·7	40·0	106	175	574
w temp.	60·5°	70·3	79·4	89 6	99·3	109·5	120·4	130·7	140·3

Jakie z tego wynikają konsekwencye dla fizyki ziemi? Niewątpliwie plastyczność składników skalnych w głębokości 10 *km* (w temperaturze przeszło 300°) musi być nieporówalnie większa niż w stanie zwykłym na powierzchni ziemi, a stan ich w głębokości 30 *km* (w temperaturach 700 — 1000°) może zbliża się już do stanu ciał miękkich, typu smoły. A prócz tego owe zjawiska, które nazwaliśmy *quasi*-plastycznością, muszą tam odgrywać coraz większą rolę, dzięki wielkości wszechstronnego ciśnienia oraz obniżenia wytrzymałości (z powodu wzrostu temperatury) [1]).

Niestety wobec braku odnośnych doświadczeń nad skałami nie można się odważyć na żadne przypuszczenia liczbowe. Tylko zauważmy: gdyby czas relaksacyi dla wnętrza ziemi był wielkością rzędu kilku miesięcy, drgania seismiczne przechodziłyby jak przez stałe ciało sprężyste, i tak samo też ziemia zachowywałaby się wobec zjawisk przypływu i odpływu morza. Do takich sił zaś, któreby trwały przez dziesiątki tysięcy lat, ziemia dostosowałaby się podobnie jak kula ciekła, pokryta stosunkowo cienką nieplastyczną skorupą. W pierwszem przybliżeniu możnaby zatem rozważania mechaniki tektonicznej, gdzie właśnie o takie siły chodzi, oprzeć na założeniu, że skorupa ziemska pływa na ciekłem jądrze. Wracając zaś do rozprawy Ampferera, widzimy, że w takim razie nie ma mowy o powstaniu owego napięcia, na którem ów autor swe argumentacye opiera, i mowy nie ma o zmiażdżeniu skorupy ziemskiej, wskutek jej własnej ciężkości, a widzimy też, że długotrwające naprężenia górotwórcze mogą być przenoszone w owej skorupie na dowolne odległości.

Sądzę, że należałoby na podstawie takiego prowizorycznego przyjęcia oraz przy pomocy matematycznej teoryi sprę-

[1]) Plastyczność wnętrza tłómaczy też, czemu ogniska trzęsień ziemi zazwyczaj leżą w bardzo nieznacznej głębokości.

żystości [1]) zbadać warunki, pod którymi powstają szeregi prostych fałd równoległych symetrycznych, asymetrycznych, fałdy skrzywione, pęknięcia, załamania itp.; jest to pole do badań teoretycznych, któreby mogły nam objaśnić pod niejednym względem najprostsze zjawiska tektoniczne. Pewne przyczynki do tego przedmiotu zamierzam na innem miejscu ogłosić.

Przy końcu rozważmy jeszcze jedną specyalną kwestyę tektoniczną t. j. ową sławną teoryę płaszczowin, równie namiętnie z jednej strony wysławianą jak z drugiej strony zwalczaną, i to zwalczaną nie tylko z powodów czysto geologicznych — w które tutaj wchodzić nie możemy — ale zwłaszcza też z punktu widzenia teoretyczno-fizycznego.

Rozpatrzmy najprzód argumentacyę A m p f e r e r a: Wytworzenie fałdu leżącego, czy też nasunięcia o szerokości 100 *km* jest połączone ze zwężeniem obszaru podlegającego fałdowaniu o 200 *km*; o taki sam kawał zatem musiała się skrócić odległość między pniem macierzystym czyli korzeniem („Wurzel“) płyty cisnącej i pniem macierzystym płyty spoczywającej, to znaczy między miejscami, gdzie warstwa podlegająca fałdowaniu jest stale zrośnięta z warstwami podkładowemi. Ponieważ zaś skurczenie warstw podkładowych mogło wynosić tylko chyba bardzo mały procent ich długości pierwotnej, przeto wynika, że owa odległość między korzeniami płyty pchającej a spoczywającej musi być bezporównanie większa, niż owe 200 *km*, czyli płyta wywołująca fałdowanie musi być nadzwyczajnie odległa od samego podnóża fałdu. Fałdy leżące mogą się zatem tylko wytworzyć jako zjawisko nadbrzeżne płyt o bezporównania większych rozmiarach niż rozmiary samych fałd. To zaś

---

[1]) Niechaj mi wolno będzie przy tej sposobności zaprotestować, ze stanowiska fizyki, przeciwko wyrażeniu, napotykanemu często, nie tylko u A m p f e r e r a, ale w klasycznych dziełach geologicznych, mianowicie: „einseitiger Druck“, ciśnienie jednostronne, które miałoby być powodem asymetryi fałd itp. Wszelkie wewnętrzne ciśnienia w ciele sprężystem są dwustronne, tak że np. ciśnieniu działającemu w kierunku NS. odpowiada równe ciśnienie w kierunku SN. Jedyna siła jednokierunkowa, która w tego rodzaju zjawiskach wchodzić może w rachubę jest to „zewnętrzna“ siła ciężkości, naprzykład składowa ciężkości, któraby na płaszczyźnie ku N nachylonej w tym kierunku działać musiała.

według Ampferera jest w sprzeczności z rzekomą niemożliwością przenoszenia bocznych ciśnień skorupy ziemskiej na wielkie odległości, oraz nie da się pogodzić z często obserwowanemi przegięciami w biegu gór fałdowych. W podobny sposób zaprzecza autor możliwości podsunięć (Unterschiebungen), któreby mogły wytworzyć tak wielkie fałdy leżące, i z tego wnioskuje, że teorya Schardt-Lugeona nie da się utrzymać.

Przeciwko temu sposobowi argumentacyi zaś podnieść trzeba, że polega on: 1) na wyobrażeniu jakoby warstwy były nierozszerzalne tak np. jak kartki książki, podczas gdy w rzeczywistości grubość ich, a zatem i szerokość może być zmienna, np. dolne ramię fałdu może być zupełnie nawet wygniecione, a zwężenie się podkładowych warstw w takim razie wcale nie musi być małe, jeżeli dopuszczamy równoczesne ich zgrubienie, 2) że twierdzenie o niemożliwości przeniesienia ciśnień na odległość jest zupełnie błędne, jak poprzednio wykazaliśmy. Oprócz tego zauważyć trzeba, 3) że plastyczność wnętrza umożliwia zupełnie dowolne przesunięcia skorupy względem podkładu — jeżeli tylko do tego pozostawiony jest dostatecznie długi przeciąg czasu, i że wobec takiego płynnego albo plastycznego jądra wogóle owe pojęcie „korzenia“ lub pnia macierzystego traci swoje znaczenie.

Poważniejszy wydaje się inny zarzut. Mellard Reade powątpiewa [w Geolog. Magazine **5**, 518 (1908)] o możliwości tak ogromnych nasunięć (dosięgających 100 mil ang.), jakie przyjmuje Lugeon i jego zwolennicy. Wyobraźmy sobie, powiada, płytę skalną pewnej grubości, a długą i szeroką na 100 mil ang. leżącą choćby na zupełnie gładkiej albo nawet smarowidłem pokrytej płaszczyźnie; czyżby to nie wymagało nieobliczalnie wielkiej siły, żeby ową płytę przesunąć? Zarzut ten wydaje się na piewszy rzut oka naiwnym, wszak łatwo obliczyć wielkość siły do tego potrzebnej, a będzie ona jeszcze bardzo mała w porównaniu z innemi siłami niewątpliwie działającemi w przyrodzie ziemi i planet. O. Fisher też w odpowiedzi [Geol. Mag. **6**, 8 (1909)] wskązuje na zjawisko nasuwania się płyt lodu, jedna na drugą, wskutek prądu rzeki cisnącego je o zaporę lodową, i sądzi, że tu istnieje ścisła analogia, tylko w większych rozmiarach. Pominąwszy, że nie godzimy się z przyczyn poprzednio wyłuszczonych z zasadni-

czą myślą teoryi Fishera, tłómaczenia sił górotwórczych jako objawów prądów ciekłego wnętrza, przyznać musimy głębsze znaczenie zarzutu M. Reada, jeżeli go wyrazimy w ściślejszej formie. Oznaczając grubość, szerokość i długość owej płyty znaczkami a, b, c, gęstość ϱ, przyspieszenie ciężkości g, widzimy, że ciężar płyty wynosi $a b c \varrho g$, a siła potrzebna do przesunięcia jej po płaszczyźnie będzie, według znanych reguł fizyki: $\varepsilon a b c \varrho g$, jeżeli ε oznacza spółczynnik tarcia płyty o materyał podstawy (np. dla żelaza o żelazo $\varepsilon = 0{\cdot}15$). Siła ta musiałaby działać na przekrój o powierzchni bc, tak że ciśnienie przypadające na jednostkę powierzchni byłoby $\varepsilon a \varrho g$, czyli takie wielkie, jak ciężar słupa pionowego o wysokości εa. Podstawiając liczby $a = 160$ *km*, $\varepsilon = 0{\cdot}15$ otrzymuje się wysokość 24 *km*, a zatem siła ta przekroczyłaby sześciokrotnie wytrzymałość granitu. Pchając z taką siłą skruszyłoby się zatem ową płytę, ale nie poruszyłoby się jej z miejsca.

Rachunek zdaje się niezbitym, ale jednak niczego nie dowodzi. Po pierwsze znów uwzględnić trzeba plastyczność materyałów, która oczywiście jest koniecznem założeniem teoryi płaszczowinowej. Jeżeli owa płyta spoczywać będzie nie na ciele idealnie sztywnem, lecz na podstawie posiadającej pewien stopień plastyczności (np. na cienkiej warstwie smoły), to w grę wchodzić będzie nie prawo tarcia ciał stałych, lecz odmienne zupełnie prawo tarcia wewnętrznego takiego materyału, które jest analogiczne do prawa tarcia w cieczach lepkich. W takim razie nawet siła dowolnie mała spowoduje ruch całej płyty, co prawda, że odpowiednio powolny. Można powiedzieć, że w takim razie pchając jednym palcem, poruszymy całą ową bryłę — jeżeli tylko będziemy pchać dostatecznie długo!

Dalej zaś jeszcze zauważę, że nawet przy użyciu materyałów całkiem nieplastycznych ruch taki musiałby powstać, gdyby płaszczyzna podkładowa była odpowiednio nachylona; w powyższym przykładzie już nachylenie 1 : 6·7 do tego wystarczy. Wogóle zdaje się, że tego rodzaju współudział ciężkości ważną rolę odgrywać musi przy genezie asymetryi fałd, a w szczególności przy genezie takich płaszczowin.

Wypada tu zwrócić uwagę na ciekawe bardzo doświadczenia profesora Sollas [Quarterly Journal Geol. Soc. **62**,

716 (1908)] nad ruchem smoły. Nałożono równoległe warstwy tej substancyi na klinowaty kawał smoły tak, że powierzchnie ich były początkowo równomiernie nachylone. Wskutek ciężkości smoła z czasem się rozpływała i przepływała przez sztuczną wyniosłość na dnie naczynia umieszczoną. Po upływie kilku miesięcy rozcięto całą masę i skonstatowano, że warstwy utworzyły płaszczowiny wraz z charakterystycznemi „deferlements", zupełnie analogicznemi do tych, które widzimy na przekrojach Lugeona z Alp szwajcarskich.

Wprawdzie Bonney [Quart. Journ. **63**, 294 (1909]) sprzeciwia się porównaniu tych doświadczeń z genezą alpejskich płaszczowin i w ogóle ostro występuje przeciwko teoryi płaszczowinowej, ale nie sądzę, żeby jego zarzuty były przekonywujące. Nie mogę oczywiście osądzić, czy Bonney ma racyę, rozdzielając wbrew opinii geologów szwajcarskich t. zw. „schistes lustrés" Lugeona na dwa odmienne i różnowiekowe typy, z czemby upadła jedna z podstaw teoryi Lugeona w zastosowaniu do Alp szwajcarskich. Ale nam chodzi obecnie o kwestyę zasadniczą, o możliwość wytworzenia takich płaszczowin. Bonney podnosi, że w doświadczeniach Sollasa nachylenie powierzchni oraz stosunek rozmiarów pionowych do rozmiarów poziomych jest znacznie korzystniejszy dla tego rodzaju zjawisk, niż w Alpach, a przedewszystkiem kładzie nacisk na fakt niewątpliwy: że skała i smoła to co innego. Ale też nikt nie twierdził, żeby płaszczowiny alpejskie miały powstać, jak u Sollasa, w ciągu dwóch miesięcy! A uwzględnić należy także pewne sprzyjające czynniki, które w przyrodzie mogły się uwydatnić, jak wpływ ciśnień stycznych oraz pewną plastyczność podkładu.

Bonney sam uznaje znaczenie doświadczeń, które wykonał Tresca nad płynięciem metali i Adams nad plastycznością marmuru, ale nie chce się zgodzić na „przeskoczenie przepaści między skałami a cieczami lepkiemi". A czy uprzytomnił sobie różnicę jednego roku a miliona lat? Jesteśmy przyzwyczajeni do obserwowania, że w zwykłych warunkach ciała stałe pozostają pozornie sztywne, aż przy przekroczeniu wytrzymałości nagle kruszeją i rozpadają się na oddzielne kawałki, i zapominamy, że mimoto różnica między niemi a cieczami nie jest zasadnicza, tylko ilościowa; a przypominam poprzednie nasze

wywody, według których różnica ta w większych głębokościach musi stopniowo zanikać wskutek wzrostu temperatury i ciśnienia. Wogóle odkształcenia, które przyjmuje teorya płaszczowinowa, nie różnią się jakościowo tylko ilościowo od przykładów deformacyi skał przez dawne teorye uznawanych; zwolennik ich musi tylko w porównaniu z dawnemi teoryami przyjąć wyższy stopień plastyczności lub odpowiednio dłuższy czas trwania zjawiska — a pod tym względem nie widzę żadnej niemożliwości. Oczywiście trzeba przy tem przyjąć dla wytłomaczenia plastyczności, że zjawisko szariażu odbywało się pod grubym płaszczem warstw powierzchownych, które równocześnie spełniały rolę „sztywnej skorupy", przenoszącej naprężenia działające w kierunku poziomym.

Nie sądzę, żeby wogóle można ze stanowiska fizyki podnieść jakikolwiek stanowczy zarzut przeciwko owej teoryi. Opozycya przeciwko zastosowaniu jej w danych przypadkach może być uzasadniona, jeżeli się opiera na konkretnych argumentach stratygraficznych, ale nie da się usprawiedliwić czysto teoretycznymi, ogólnikowymi argumentami, jak „nieprawdopodobieństwo tak wielkich nasunięć, różnica skał a cieczy lepkich" i t. p.[1]).

Na razie musimy się ograniczyć na tak ogólnikowych powiedzeniach i ani myśleć jeszcze nie możemy o jakich ściślejszych, liczbowych określeniach, ale dokładniejsze badania doświadczalne nad zjawiskami plastyczności oraz uwzględnienie ich w teoryi wytrzymałości wraz z postępem seismologii otworzą nam niewątpliwie kiedyś także drogi ku temu celowi wiodące.

ZUSAMMENFASSUNG.

Im ersten Abschnitt wird die Arbeit O. Ampferer's: Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen [Verh. d. geol.

---

[1]) Trafne zarzuty, które Rudzki [Fizyka ziemi, Kraków (1909), str. 215] podnosi przeciwko teoryi Bertranda, nie dotyczą kwestyi tu nas zajmującej, czy powstanie płaszczowin jest wogóle możliwe, lecz kwestyi czemu one w Alpach powstały. Pod tym względem istotnie rozważania Bertranda, oparte na teoryi izostatycznej, są niewystarczające.

Reichs Anst. Wien **56**, (1906)] einer kritischen Analyse unterzogen. Verfasser weist nach, dass die von Ampferer gegen die Kontraktionstheorie erhobenen Einwände teils auf fehlerhaften, mit den Principien der Festigkeitslehre in Widerspruch stehenden Überlegungen, teils auf unbewiesenen, willkürlichen Annahmen beruhen. Insbesondere kann man aus dem Verhalten eines im Inneren hohlen Erdringes gar keinen Schluss auf das Verhalten der wirklichen Erdkruste siehen, da dieselbe eben keine Hohlkugel ist, sondern auf dem inneren Erdkern ruht oder schwimmt. Daher ist die Behauptung Ampferer's, dass die Fortleitung von tangentiellen Drucken in der Erdkruste unmöglich sei, da sie eine Zertrümmerung derselben bewirken müsste, ganz haltlos. Der von Ampferer gebrauchte Ausdruck „Erdhaut" erweckt die irrige Vorstellung, als ob die äussteren Schichten besonders schwach wären, während sie in Wirklichkeit steifer sind als das Innere. Der Begriff der widerstandfähigen „Teilgewölbe" ist gegenstandslos, da er auf einer Verwechslung mit dem Widerstand gegen verticale Belastung beruht. Willkürlich ist die Annahme, dass die Erdkruste aus relativ kleinen festen Schollen besteht, welche durch weichere Massen getrennt sind. Verfasser verwirft die Behauptung Ampferers, dass Falten infolge Zusammenschubes von festen Schollen nur an der Stirne derselben aufgeworfen werden könnten, als ganz unbegründet. Es ist überhaupt nicht möglich, derlei Speculationen in rationeller Weise durchzuführen, ohne eine Annahme über die Eigenschaften des Erdkerns und über die Art und Weise wie die äussere Kruste mit demselben verbunden ist, zu machen. Die Kenntnis dieser Umstände ist eine unumgänglich notwendige Voraussetzung der theoretisch-deductiven Behandlung tektonischer Probleme. Zusammenfassend folgt also: *a*) die Behauptung Ampferers, dass Faltengebirge nicht von weit fortgeleiteten Druckkräften herrühren können, sondern Wirkungen von Kräften sein müssen, welche in der unmittelbaren Umgebung localisirt sind, ist ganz unbegründet, *b*) die eigene Theorie Ampferer's, welche die gebirgsbildenden Kräfte auf Kraftäusserungen und Strömungserscheinungen des Erdinneren zurückführt, ist so unbestimmt, dass sich wenig Nutzen aus derselben erwarten lässt.

Verfasser ist jedoch kein unbedingter Anhänger der Kontraktions-Theorie. Die Grundlagen derselben sind durch Entdeckung der Wärmentwicklung radioactiver Stoffe erschüttert worden, und es ist sogar fraglich ob sich die Erde überhaupt im Abkühlungsstadium befindet. Der Radiumgehalt des Erdkörpers ist ein erst klassiger Factor im Wärmehaushalt der Erde; solange wir die diesbezüglichen Daten nur für die Oberflächengesteine kennen, sind Speculationen über die Temperaturverteilung im Inneren vollständig haltlos. Dies gilt auch von der sonst sehr interessanten Arbeit Wolffs: Die vulkanische Kraft u. d. radioaktiven Vorgänge in. d. Erde [Z. d. D. geol. Ges. **60**, 431 (1908)], in welcher angenommen wird, dass die radioaktiven Stoffe zwar in der ganzen Erde ungefähr gleichmässig verteilt sind, dass dieselben aber nur dann (unter Wärmeabgabe) zerfallen, fals der Druck unter einer gewissen Grenze bleibt, so dass mithin nur die äussere Kruste als Wärmequelle in Betracht kommt. Ein Druckeinfluss auf den Zerfallsprocess ist unerwiesen und sehr unwahrscheinlich. Ebenso sind die übrigen Voraussetzungen der Rechnung, wie die Annahme gleichmässigen Radiumgehalts, die Zahlenwerte der Tamman'schen Schmelz-Curve, die Annahme eines stationären Zustandes recht willkürlich. Bei nur geringfügiger Änderung eines dieser Factoren würden die Folgerungen ganz verschieden ausfallen, daher ist auch das von Wolff abgeleitete Resultat — dass unter der äusseren Erd-Kruste eine Magmaschicht liege, hierauf wieder eine feste Schichte folge, welche die inneren Magmamassen von den äusseren trennt — zwar möglich, aber durchaus nicht wahrscheinlich.

Nun folgt eine Besprechung der für und gegen die Starrheit des Erdkörpers sprechenden Erscheinungen, welche sich insgesammt am besten vom Standpunkt der Visciditäts-Theorie erklären lassen. Dies hängt mit unserer Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der festen Körper zusammen. Daher werden im Weiteren die neueren Untersuchungen von Voigt, Föppl, Williams, Hancock, über Festigkeit besprochen, denen zufolge die Bruchgefahr nicht vom Absolutbetrag der Spannungen sondern von der Differenz der Maximal- und Minimal-Spannung abhängt. Somit tritt bei allseitig gleichem Druck überhaupt keine Zertrümmerung ein, selbst falls der-

selbe beliebig gross ist. Hiemit ist die Grundlage der Heim'schen Theorie des „latent-plastischen" Zustandes hinfällig geworden.

Im Folgenden wird aber auf Grund einer eingehenden Darlegung der neueren Experimental-Arbeiten über Plasticität gezeigt, dass Heim trotzdem Recht hat, eine mit der Tiefe wachsende Plasticität der Gesteine anzunehmen, nur tritt dies nicht in so geringen Tiefen und nicht in solchem Ausmass ein, als Heim vermuthete. Der Grund ist nicht so sehr die Druck- sondern die Temperaturzunahme. Nebstbei treten allerdings noch Erscheinungen ein, die vom Verfasser als quasi-Plasticität bezeichnet werden, indem in Gesteinen, welche auf Bruch beansprucht werden, bei Überschreitung der Festigkeitsgrenze die bruchlose Umformung erleichtert wird, falls dieselben unter hohem allseitigen Druck stehen. Aus alledem wird gefolgert, dass die Erdkruste sich im Allgemeinen gegenüber lang dauernden gebirgsbildenden Kräften so verhalten muss, als ob sie auf einem flüssigen Innenkern schwimmen würde, während der Erdkörper kurzdauernden Kräften gegenüber elastisch fest bleibt.

Den Schluss bilden Überlegungen über die Schardt-Lugeon'sche Theorie. Ampferer's Einwände gegen dieselbe beruhen auf dem als unrichtig erwiesenen Grundsatz der Unmöglichkeit einer Fortleitung der Tangential-Spannungen auf grössere Entfernungen sowie auf der Voraussetzung, dass die Schichten beinahe unausdehnbar sein; in Wirklichkeit kann deren Dicke und im Zusammenhang damit auch deren Horizontaldimension in weiten Grenzen variiren. Auch ist der Begriff der „Wurzeln" bei einem plastischen Kern überhaupt von problematischem Wert. Hierauf werden Mellard-Reades Einwände besprochen, und es wird auf die Rolle der Schwerkraft und dadurch verursachte Gleiterscheinungen hingewiesen, welche auch in Sollas' Pech-Experimenten zum Ausdruck kommt. Bonney's Einwände sind unberechtigt, da der Unterschied in der Plasticität von Pech und Fels (bei höherer Temperatur und bei hohem Druck!) zwar sehr gross aber doch nur graduell ist und bloss eine dem entsprechend grössere Zeitdauer zur Hervorbringung analoger Phänomene erfordert. Vom physikalisch-theoretischen Standpunkt aus lässt sich also gegen die Schardt-Lugeon'sche Theorie kein ernstlicher Einwand erheben.